中国生态农业学报 2016 年 8 月 第 24 卷 第 8 期
Chinese Journal of Eco-Agriculture, Aug. 2016, 24(8): 1103−1113

DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.160089

灌浆期高温胁迫对小麦灌浆的影响及叶面喷剂的缓解作用*

曹彩云 党红凯 郑春莲 郭 丽 李科江 马俊永**

(河北省农林科学院旱作农业研究所/河北省农作物抗旱研究重点实验室/农业部河北南部耕地保育科学观测实验站 衡水 053000)

摘 要 针对我国华北麦区灌浆期高温影响小麦灌浆和产量的问题，本研究在 2013—2014 年和 2014—2015 年两个小麦生长季，采用田间塑料棚自然升温的方式，在灌浆期设 4 个时段高温胁迫处理作为主处理，两年分别在花后 12~25 d、12~16 d、15~20 d 和 20~25 d，花后 8~21 d、8~12 d、14~20 d 和 16~21 d 进行高温处理，以不罩棚自然温度作为对照(分别用 A1、A2、A3、A4 和 A5 表示, A5 为对照)；以 0.2%磷酸二氢钾、0.05%硫酸锌、清水和不喷施 4 个喷剂作为副处理(分别用 B1、B2、B3 和 B4 表示)，研究了灌浆期不同时段高温处理对小麦籽粒灌浆的影响及喷施不同叶面喷剂对高温胁迫的缓解作用，并对不同处理下的小麦灌浆特征进行了量化分析。研究结果表明: (1)小麦灌浆期不同时段高温与自然温度对比均造成小麦减产，减产幅度两个试验年度分别为 12.64%~15.34%和 2.04%~9.41%，并且高温胁迫时间长，处理时间早的 A1 减产幅度最大，且较对照 A5 达极显著水平；高温减产的直接原因是小麦穗粒数减少及千粒重降低，两个试验年度穗粒数分别减少 0.71~5.45 个和 1.73~3.00 个，千粒重分别降低 1.28~3.41 g 和 0.84~4.27 g；从 2013—2014 年度模型模拟的灌浆特征看，不同时段高温处理使小麦提前到达第 1 和第 2 拐点, A1~A4 第 1 拐点较对照提前 0.29~0.75 d、第 2 拐点提前 0.22~1.42 d，因此高温处理缩短了灌浆时间，且平均灌浆速率降低，最终造成千粒重降低。(2)叶面喷剂具有缓解高温胁迫的作用，两个试验年度叶面喷剂分别比不喷对照提高产量 3.08%~7.05%和 2.09%~3.52%，可一定程度缓解高温对穗粒数和千粒重的不良影响，两个试验年度叶面喷剂分别增加穗粒数 1.04~2.30 个和 0.95~2.01 个，提高千粒重 1.10~1.42 g 和 0.60~0.89 g，且 B1 效果最好；从灌浆数值特征分析看，叶面喷剂推迟了到达第 1 和第 2 拐点的时间，不同喷剂推迟到达第 1 拐点时间为 0.48~0.98 d，推迟到达第 2 拐点的时间为 0.32~0.98 d，延长了灌浆的时间，平均灌浆速率提高 0.01~0.04 $mg\cdot grain^{-1}\cdot d^{-1}$，以 B1(磷酸二氢钾)的作用最好。因此叶面喷剂可延长小麦灌浆期，不同程度地增加了穗粒数和千粒重，是增产和减灾的有效措施之一。

关键词 高温胁迫 灌浆特性 Logistic 模型 叶面喷剂 增产机理 小麦
中图分类号: S363 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-3990(2016)08-1103-11

Impact of high temperature stress on grain-filling and the relief effect of foliage sprays during grain-filling stage of wheat*

CAO Caiyun, DANG Hongkai, ZHENG Chunlian, GUO Li, LI Kejiang, MA Junyong**

(Institute of Dry-land Farming, Hebei Academy of Agriculture and Forestry Sciences / Key Laboratory of Crop Drought Resistance of Hebei Province / Scientific Observation and Experiment Station of Farmland Conservation in South Hebei, Ministry of Agriculture, Hengshui 053000, China)

Abstract In order to relieve damages caused by frequent high temperatures at grain-filling stage to grain filling and yield

* 公益性行业(农业)科研专项(201203033-2, 201303133-1)和国家科技支撑计划项目(2013BAD05B05-02)资助
** 通讯作者: 马俊永，主要从事节水培肥研究。E-mail: mjydfi@126.com
曹彩云，主要从事作物栽培与节水研究。E-mail: cycao1234@126.com
收稿日期: 2016−01−22 接受日期: 2016−04−26

* This study was supported by the Special Found for Agro-scientific Research in the Public Interest of China (201203033-2, 201303133-1) and the National Key Technology Research and Development Program of China (2013BAD05B05-02).
** Corresponding author, E-mail: mjydfi@126.com
Received Jan. 22, 2016; accepted Apr. 26, 2016

decreasing of wheat in the North China Plain, a study was conducted in 2013–2014 and 2014–2015 growing seasons. A split block design was used with 4 different high temperature stress treatments (A1, A2, A3 and A4) produced by plastic sheet covering and no covering (A5) as control. Treatments A1, A2, A3, A4 and A5 were covered with plastic sheets at 12–25 d, 12–16 d, 15–20 d, 20–25 d after anthesis in 2013–2014 and 8–21 d, 8–12 d, 14–20 d, 16–21 d after anthesis in 2014–2015, respectively. Three foliar sprays [0.2% potassium dihydrogen phosphate (B1), 0.05% zinc sulfate (B2), water (B3)] were applied at booting and early milking stages as the sub-treatments with no spray as the control (B4). The impacts of high temperature stress and the relieving effect of foliar spray on grain-filling during grain-filling stage were quantified via model simulation. The results showed that high temperature stress reduced grain weight, grain number per spike and grain yield of wheat. For yield losses under different temperature stress treatments, A1, A2, A3 and A4 were 15.34%, 13.11%, 14.93% and 12.64% in 2013–2014, and 9.41%, 3.89%, 4.93% and 2.04% in 2014–2015, respectively, compared with control. Yield of A1 was lowest among all the treatments and the difference between A1 and A5 (CK) was significant at $P < 0.01$. No significant differences existed among A2, A3, A4 and A5 in terms of yield. For 1000-grain weight, A1, A2, A3 and A4 respectively decreased by 1.96 g, 3.41 g, 1.71 g and 1.28 g in 2013–2014, and respectively by 4.27 g, 0.84 g, 1.23 g and 2.19 g in 2014–2015 compared with CK. Furthermore, grain numbers per spike decreased respectively by 5.45, 1.45, 0.87 and 0.71 in 2013–2014, and by 1.95, 2.30, 3.00 and 1.73 in 2014–2015. The established grain-filling process models showed that high temperature stress advanced the first inflection points by 0.48 d, 0.75 d, 0.46 d and 0.29 d and the second inflection points by 0.92 d, 1.42 d, 0.61 d and 0.22 d, respectively, compared with the control, which shortened the duration of wheat grain filling. The average grain-filling rate also decreased which resulted in lower 1000-grain weight. The application of sprays delayed the first and the second inflection points and prolonged grain-filling, which increased grain weight and yield. B1, B2 and B3 increased grains per spike by 2.30, 1.21 and 1.04 in 2013–2014, and by 2.01, 2.75 and 0.95 in 2014–2015, respectively, over B4. The 1000-grain weights of B1, B2 and B3 were respectively 1.10 g, 1.42 g and 0.89 g greater than B4. Based on the grain-filling process models, the times to maximum grain-filling rates delayed respectively by 0.73 d, 0.69 d and 0.61 d, and the average filling rate increased by 0.04 $mg \cdot grain^{-1} \cdot d^{-1}$, 0.03 $mg \cdot grain^{-1} \cdot d^{-1}$ and 0.01 $mg \cdot grain^{-1} \cdot d^{-1}$ over B4. Therefore, longer filling stage, higher grain weight and higher grain numbers per spike were main mechanisms of yield increase due to foliar spray treatments. Foliar spray mitigated the effects of high temperature stress on grain-filling. Yield promotion effects of B1 and B2 were better under high temperature than under normal temperature, and B1 had the best effect among all foliar spray treatments.
Keywords High temperature stress; Grain-filling characteristics; Logistic model; Foliar spray; Yield-increase mechanism; Wheat

小麦(*Triticum aestivum*)属喜凉作物，籽粒灌浆阶段的适宜温度为 20~24 ℃，而灌浆期是决定小麦最终产量和品质的关键时期[1]。但在我国北方地区，小麦生育后期温度回升快，常出现高温天气，尤其是在干燥条件下，高温低湿伴随着大风，形成典型的干热风，导致小麦高温逼熟，减产幅度可达 10%~30%，成为我国北方麦区小麦生产中最主要障碍因子之一[2−4]。随着全球气候变暖，小麦生育后期遭受高温危害将进一步加重[5]，因此小麦耐热性和温度胁迫等方面的研究具有十分重要的理论与实践意义。灌浆期的高温可使小麦植株衰老加速，灌浆期缩短，对小麦籽粒产量和品质的形成产生了极为不利的影响[6−8]。姜春明等[9]研究了花后不同时期高温胁迫对小麦旗叶膜脂过氧化物质和保护酶活性的影响，发现花后 8~10 d 对小麦进行高温处理，能有效启动旗叶内活性氧防卫系统，从而降低膜脂过氧化程度，但灌浆中期高温胁迫造成的伤害不可恢复。郭秀林等[10]研究了不同基因型小麦耐热机理，结果表明花后 5~7 d 高温诱导能显著延长生育后期植株热致死时间，植株将获得耐热性，并一直保持至成熟期，而且花后适当高温锻炼有利于干物质向籽粒运输[11−12]。郭文善等[13]用 ^{14}C 示踪方法，研究了小麦灌浆期在 30 ℃和 40 ℃温度条件下光合产物的运转，结果表明高温胁迫剑叶光合同化效率降低，抑制了籽粒中光合产物的累积，导致最终千粒重降低。王晨阳等[14]采用人工气候模拟的方法，研究了小麦灌浆期高温对小麦旗叶叶绿素 a 荧光参数的影响，结果表明温度胁迫降低旗叶 F_o、F_v、F_m、F_v/F_m 及 F_v/F_o，从而导致 PSⅡ潜在活性及光化学效率降低。就高温和干热风防控措施方面前人也做了大量的研究，Rehman 等[15]采用人工辅助升温的方法，进行耐热种质资源筛选。在小麦起身、拔节期喷洒草木灰水、磷酸二氢钾，灌浆期用 0.1%醋酸或 1∶800 倍食醋溶液进行叶面喷洒，扬花、灌浆期喷洒石油助长剂等措施，提高小麦抗高温和干热风的能力[16]。灌浆期适当喷施调节剂可延缓叶片衰老的进程，协调源库关系，降低高温胁迫对植株的伤害程度[17−18]。前人在灌浆期高温对小麦耐热性、产量、品质、光合机

理及防御措施等方面进行了大量的研究，同时对小麦灌浆进程模拟也有许多研究，但对高温胁迫及采用叶面喷剂防控措施后的籽粒灌浆模拟及参数特征分析报道很少，而且多是在固定温度胁迫或温室的条件下进行的。本研究在田间条件下，利用塑料棚膜自然增温的方式，以不罩棚自然温度作对照，在灌浆不同时段进行高温胁迫，同时研究了不同叶面调节剂对胁迫的缓解作用，通过籽粒灌浆进程模型模拟其灌浆进程，揭示其产量的影响机理，以期为该区灌浆期高温对产量的影响机理及增产栽培措施提供数据支撑。

1　材料与方法

1.1　试验概况

试验在 2013—2014 年和 2014—2015 年两个小麦生长季，于河北省农林科学院旱作农业研究所旱农节水试验站进行。试验土壤为黏质壤土，播前基础土壤养分：有机质 15.5 g·kg^{-1}，速效磷 33.3 mg·kg^{-1}，速效钾 126.2 mg·kg^{-1}，碱解氮 84.7 mg·kg^{-1}。2013—2014 年度小麦播种时间为 2013 年 10 月 18 日，翌年春季灌水 3 次(灌水时间：3 月 25 日、4 月 25 日和 5 月 20 日)，2014 年 6 月 9 日收获。2014—2015 年度小麦播种时间为 2014 年 10 月 11 日，2014 年 11 月 15 日浇冻水，翌年春季灌水 3 次(灌水时间：3 月 25 日、4 月 26 日和 5 月 20 日)，收获时间 2015 年 6 月 11 日。其他管理同大田，两年度小麦生育期降雨量分别为 136.4 mm 和 143.9 mm(常年降雨量 109 mm)。供试品种‘衡 4399’。

1.2　试验材料与方法

1.2.1　试验设计

试验采用裂区设计，设 4 个不同时段高温处理作为主处理，用 A 表示：2013—2014 年时段分别为 5 月 12—25 日(A1，花后 12~25 d)、5 月 12—16 日(A2，花后 12~16 d)、5 月 15—20 日(A3，花后 15~20 d)和 5 月 20—25 日(A4，花后 20~25 d)，2014—2015 年时段分别为 5 月 12—25 日(A1，花后 8~21 d)、5 月 12—16 日(A2，花后 8~12 d)、5 月 18—24 日(A3，花后 14~20 d)和 5 月 20—25 日(A4，花后 16~21 d)，以不罩棚的自然处理作对照(A5)。温度处理用塑料薄膜搭棚来实现，棚内外温度见表 1(温度和湿度用 JL-16 型温湿度记录仪进行监测)。

副处理为叶面喷剂处理用 B 表示，叶面喷剂分别为：0.2%磷酸二氢钾(B1)、0.05%硫酸锌(B2)、清水(B3)、不喷施(B4)。在孕穗期(4 月 28 日)和灌浆初期(5 月 7 日)两次进行叶面喷施，每次喷水量 450 kg·hm^{-2}。

所有处理 3 次重复，小区面积 31.5 m^2(7 m×4.5 m)。底施二铵 495 kg·hm^{-2}(含 N 17%，P_2O_5 47%)、尿素 150 kg·hm^{-2}(含 N 46%)，结合春一水追施尿素 375 kg·hm^{-2}。

1.2.2　测试指标及方法

灌浆速率：扬花前每区选开花一致的穗进行挂牌标记，扬花后 3 d 开始测定(2013—2014 年扬花期为 5 月 1 日，2014—2015 年为 5 月 4 日)，取样频次每隔 3 d 取样一次，每个小区选择 10 穗，105 ℃杀青，80 ℃烘干至恒重，测定穗粒数和籽粒干重，计算粒重。

灌浆模型：在农业科研领域广泛应用 Logistic 曲线描述粒重的增长过程[19]，根据理论回归模型 $Y_t=k/(1+e^{a+bt})$进行模拟；式中 Y_t 为 t 时刻的籽粒干物质重，即干物质积累量；t 为灌浆开始后持续的天数；a、b、k 为参数，当 t 趋于无穷大时 Y_t 值为其理论粒重。对方程求二阶导数，并令其值为 0，得到最大灌浆速率出现的时间 $t_{max}=\ln a/b$；代入一阶导数方程得到最大灌浆速率 $V_{max}=kb/4$，平均灌浆速率 V=最大干物质累积量(g)/生长持续期(d)；方程曲线两个拐点，把生长或灌浆过程分为前中后 3 个时期，两个拐点的计算公式为：$t_{1,2}=-\ln[(4\pm3.464)/2a]/b$。

产量和产量性状：成熟期在每区的中心区域取有代表性的样块 3 个，每个 1 m^2，合计 3 m^2 进行小区测产，折算公顷产量；收获时随机在每小区选择有代表性的穗 40 个，测定穗粒数，取其平均值；千粒重从小区测产风干样品中数取两个 500 粒称重，两样品称重值相差不超过 0.3 g，两样品重量和为千粒重值。

1.2.3　数据处理方法

采用唐启义[20]著的 DPS 数据处理系统进行统计分析和籽粒灌浆进程模型模拟分析，Microsoft Excel 软件进行作图及数据分析。

2　结果与分析

2.1　不同时段高温处理对小麦产量和产量性状的影响

本文产量和产量性状以两年结果进行分析，其他研究结果主要以 2013—2014 生长季进行分析。

从不同时段高温处理和对照的产量结果看(表 2)，两年结果趋势一致，2013—2014 年和 2014—2015 年高温处理的 A1、A2、A3 和 A4 处理平均分别较对照 A5 减产 15.34%、13.11%、14.93%、12.64%和 9.41%、3.89%、4.93%、2.04%。2013—2014 年各高温处理较对照差异达到极显著水平，各高温处理间差异不显著。2014—2015 年 A1 处理较对照 A5 差异达到极显著水平，较 A2、A3、A4 处理差异不

表 1 小麦灌浆期试验棚内外温度和湿度变化

Table1 The changes of temperature and humidity inside and outside shed during the filling stage of winter wheat

测定时间 (年–月–日) Measured date (year-month-day)	日均温度 Daily mean temperature (℃)		日均温差 Daily temperature difference (℃)	日最高温度 Daily highest temperature (℃)		日最高温差 Highest daily temperature different (℃)	14:00 温度 Temperature at 14:00 (℃)		14:00 温差 Temperature difference at 14:00 (℃)	14:00 湿度 Humidity at 14:00 (%)	
	棚内 Inside	棚外 Outside		棚内 Inside	棚外 Outside		棚内 Inside	棚外 Outside		棚内 Inside	棚外 Outside
2014-05-12	19.1	18.7	0.4	31.2	27.7	3.5	30.7	27.7	3.0	48.8	46.3
2014-05-13	20.7	20.4	0.3	31.2	27.7	3.5	30.2	27.6	2.6	62.5	61.4
2014-05-14	16.5	15.5	1.0	25.1	22.2	2.9	21.0	19.6	1.4	65.4	60.5
2014-05-15	18.9	19.4	–0.5	31.5	28.3	3.2	31.5	28.1	3.4	56.8	45.7
2014-05-16	19.7	19.1	0.7	30.3	27.9	2.4	29.8	27.4	2.4	57.2	53.9
2014-05-17	20.0	18.3	1.6	31.8	28.7	3.1	31.8	28.5	3.3	54.6	48.9
2014-05-18	20.9	20.4	0.6	31.5	28.8	2.7	31.5	28.8	2.7	59.1	51.8
2014-05-19	23.1	23.4	–0.2	33.0	31.1	1.9	33.0	31.1	1.9	53.2	51.8
2014-05-20	23.8	22.7	1.1	33.9	31.4	2.5	33.9	32.1	1.8	57.6	56.1
2014-05-21	24.2	23.2	1.0	35.2	33.5	1.7	35.2	33.5	1.7	61.0	60.9
2014-05-22	24.0	23.3	0.7	34.3	31.6	2.7	34.1	31.6	2.5	47.1	44.0
2014-05-23	24.1	23.9	0.2	32.7	30.3	2.4	31.8	30.0	1.8	53.2	49.4
2014-05-24	24.3	23.1	1.1	32.3	29.9	2.4	31.2	29.4	1.8	73.3	71.5
2014-05-25	22.2	20.9	1.2	28.1	25.8	2.3	27.6	25.3	2.3	63.3	55.1
2015-05-12	18.0	18.0	0.0	29.9	27.8	2.1	29.9	27.8	2.1	78.4	46.1
2015-05-13	21.6	22.3	–0.6	33.2	32.1	1.1	32.8	31.6	1.2	79.4	45.2
2015-05-14	19.7	19.3	0.4	27.5	28.1	–0.6	26.7	26.5	0.2	85.4	49.1
2015-05-15	18.7	17.4	1.3	28.4	25.6	2.8	28.4	25.6	2.8	81.8	52.3
2015-05-16	19.9	19.0	0.9	30.5	29.5	1.0	30.5	29.5	1.0	82.1	49.1
2015-05-17	23.3	23.7	–0.4	33.0	31.3	1.7	32.9	31.0	1.9	81.7	56.0
2015-05-18	23.7	23.5	0.2	33.9	33.7	0.2	33.5	33.4	0.1	80.8	50.3
2015-05-19	19.6	19.6	0.0	29.4	28.4	1.0	29.3	28.4	0.9	78.0	37.3
2015-05-20	19.0	17.7	1.3	30.6	31.1	–0.5	30.4	29.2	1.2	78.2	42.8
2015-05-21	17.6	16.6	1.0	25.9	25.4	0.5	25.6	25.2	0.4	91.2	52.3
2015-05-22	20.4	19.7	0.7	31.9	31.3	0.6	31.9	30.9	1.0	80.0	50.6
2015-05-23	21.6	20.6	1.0	32.6	31.9	0.7	32.6	31.6	1.0	79.5	47.8
2015-05-24	22.3	21.3	1.0	33.8	32.7	1.1	33.5	32.7	0.8	77.6	40.9
2015-05-25	22.2	21.7	0.5	33.6	32.8	0.8	33.6	32.8	0.8	78.9	39.5

显著；A3 处理较 A5 差异达到显著水平，A2、A3、A4 处理间差异不显著；A2、A4 处理较 A5 差异不显著。说明不同时段高温均造成一定的减产，且高温胁迫时间越长减产幅度越大。副处理 B1、B2 和 B3 在 2013—2014 年和 2014—2015 年分别平均较对照 B4 增产 7.05%、5.28%、3.08%和 3.52%、3.23%、2.09%；2013—2014 年 B1、B2 较对照 B4 差异达极显著水平，B1、B2 间差异不显著，B1 和 B3 间差异达显著水平，B2 和 B3 间差异不显著；2014—2015 年 B1、B2 和 B3 处理较对照 B4 差异达到显著水平，且 B1、B2 较对照 B4 差异达到极显著水平，B1、B2 和 B3 处理间差异不显著，叶面喷剂起到了增产作用。2013—2014 年不同时段高温处理下 B3、B2、B1 较 B4 的增产幅度分别为 3.73%~7.57%、5.51%~7.99%、0.76%~8.99%和 1.32%~6.64%(常温处理的增产幅度为 2.73%~4.50%)，B1 喷剂的增产效果最大，其次为 B2 和 B3，且 A1B1 较对照差异达显著水平，其他时段喷剂处理间差异不显著，说明高温胁迫的情况下，B1 起到了较好的增产作用。2014—2015 年不同时段喷剂的增产作用没有对照田的大，可能与两年处理的温差和气候年型有关。

从产量性状看(表 2)，不同时段的高温处理造成了穗粒数的降低。2013—2014 年穗粒数 A1、A2、A3 和 A4 分别较对照平均减少 5.45 个、1.45 个、0.87

表 2　不同时段高温胁迫和喷剂处理对小麦产量和产量性状的影响

Table 2　Effects of different treatments of high temperature stresses and foliar sprays on yield and yield components of winter wheat

高温处理 High temperature treatment	叶面喷剂处理 Foliar spray treatment	穗粒数 Grain number per spike		千粒重 1000-grain weight (g)		产量 Yield (kg·hm^{-2})	
		2013—2014	2014—2015	2013—2014	2014—2015	2013—2014	2014—2015
A1	B1	33.35±0.19aA	40.33±1.86a	42.55±0.15a	38.94±0.59aA	6 932.36±34.4a	8 500.43±192.46a
	B2	30.83±1.10bAB	39.97±0.47a	43.17±0.48a	35.44±0.33bB	6 926.22±158.24a	8 278.19±222.23a
	B3	29.92±0.34bcB	39.27±1.24a	43.48±0.67a	35.72±0.81bB	6 685.44±148.16ab	8 500.43±254.60a
	B4	28.82±1.04cB	38.63±0.76a	41.91±0.58a	35.66±0.63bB	6 444.77±112.27b	8 444.87±242.17a
A2	B1	35.10±0.49a	39.33±0.90a	41.69±0.88a	40.41±0.72a	7 123.46±112.97a	9111.57±144.99a
	B2	35.00±0.42a	40.37±1.07a	42.87±1.43a	38.90±0.29a	7 018.84±321.30a	9 000.45±96.23ab
	B3	34.83±0.87a	38.93±0.13a	40.28±0.36a	40.23±1.14a	6 959.62±75.99a	8 944.89±242.17ab
	B4	34.23±0.30a	38.17±0.66a	40.46±0.53a	39.95±0.40a	6 596.47±79.74a	8 722.66±200.32b
A3	B1	36.07±0.27a	38.53±1.47a	43.42±0.10a	39.01±0.25a	7 185.54±391.98a	8 944.89±200.32ab
	B2	35.53±0.52a	40.20±0.25a	43.36±0.69a	40.78±0.11a	6 697.05±85.11a	9 167.13±96.23a
	B3	35.77±0.35a	37.77±0.30a	42.94±0.24a	38.77±0.64a	6 642.92±246.31a	8 722.66±55.56ab
	B4	34.13±0.84a	37.50±1.06a	42.35±0.53a	39.36±0.99a	6 592.92±148.16a	8 555.98±55.56b
A4	B1	36.53±0.70a	39.87±1.81ab	43.79±0.06a	39.14±1.46a	7 192.92±110.96a	9 222.68±111.12a
	B2	35.50±0.72a	42.80±1.18a	44.03±0.52a	40.01±0.91a	7 078.07±116.64a	9 167.13±96.23a
	B3	35.63±0.46a	39.50±1.17ab	43.77±0.81a	37.60±0.63a	6 833.58±90.63a	9 111.57±146.99a
	B4	34.47±0.63a	36.93±0.27b	42.20±0.62b	37.34±0.91a	6 744.77±88.59a	8 889.33±111.12a
A5	B1	37.42±0.39a	43.37±1.27a	45.11±0.29a	40.27±0.76a	8 037.44±206.22ab	9 420.22±189.06a
	B2	36.19±0.58ab	41.80±1.21ab	44.74±0.51ab	41.17±1.53a	8 148.56±37.04a	9 457.26±207.70a
	B3	36.03±0.53ab	40.67±0.13b	44.96±0.24ab	40.41±0.63a	8 000.40±64.15ab	9 296.76±129.97a
	B4	35.35±0.57b	40.17±0.23b	44.12±0.19b	41.00±0.55a	7 692.22±133.86b	9 049.83±68.74a

A1：高温胁迫时间为 14 d，2013—2014 年和 2014—2015 年分别为花后 12~25 d 和花后 8~21 d；A2：高温胁迫时间为 5 d，2013—2014 年和 2014—2015 年分别为花后 12~16 d 和花后 8~12 d；A3：高温胁迫时间为 6~7 d，2013—2014 年和 2014—2015 年分别为花后 15~20 d 和花后 14~20 d；A4：高温胁迫时间为 6 d，2013—2014 年和 2014—2015 年分别为花后 20~25 d 和花后 16~21 d；A5：大田自然温度。B1：0.2%磷酸二氢钾；B2：0.05%硫酸锌；B3：清水；B4：不喷施。表中数值为 3 次重复的平均值±标准误，同列不同大小写字母分别表示每个主处理下副处理间 0.01 和 0.05 水平差异显著性，下同。A1: high temperature stress for 14 days, at 12–25 after anthesis in 2013—2014 and 8–21 in 2014—2015; A2: high temperature stress for 5 days, at 12–16 after anthesis in 2013—2014 and 8–12 in 2014—2015; A3: high temperature stress for 6 or 7 days, at 15–20 after anthesis in 2013—2014 and 14–20 in 2014—2015; A4: high temperature stress for 6 days, at 20–25 after anthesis in 2013—2014 and 16–21 in 2014—2015; A5: natural temperature. B1: 0.2% monopotassium phosphate; B2: 0.05% zinc sulfate; B3: fresh water; B4: non foliar spray. The values are means of three replicates with SE. In the same column, different capital and small letters mean significant difference of each foliar spray under different temperature treatments at 0.01 and 0.05 levels, respectively. The same below.

个和 0.71 个，且 A1 和 A2 时段较 A5 差异达到极显著水平，A3 较 A5 达到显著水平，A4 较 A5 差异不显著；各高温时段处理间 A1 处理较 A2、A3、A4 处理差异均达显著水平，A2、A3、A4 处理间差异不显著。2014—2015 年穗粒数 A1、A2、A3 和 A4 分别较对照减少 1.95 个、2.30 个、3.00 个和 1.73 个，且 A1、A2、A3 处理均较对照差异达到显著水平，但 A1、A2、A3 和 A4 处理间差异不显著。叶面喷剂起到了增加穗粒数的作用，2013—2014 年 B1、B2 和 B3 分别较对照 B4 增加 2.30 个、1.21 个和 1.04 个，差异较对照均达到极显著水平；B1 处理的增粒作用明显，较 B2 和 B3 处理差异达极显著水平，B2、B3 处理间差异不显著。2014—2015 年 B1、B2 和 B3 分别较对照 B4 增加 2.01 个、2.75 个和 0.95 个，B1 和 B2 较对照差异达到极显著水平；处理 B1、B2 间和处理 B1、B3 间差异不显著，B2 和 B3 间差异达极显著水平。两年不同时段高温处理下喷剂对穗粒数的影响作用不同，2013—2014 年 A1B1、A1B2 的增粒效果好，较对照差异达显著水平，其他时段喷剂处理间差异不显著；2014—2015 年 A4B2 的增粒效果好，其他时段喷剂有增粒数的作用，但差异不显著。

从千粒重看，高温不利于粒重的提高。2013—2014 年和 2014—2015 年 A1、A2、A3 和 A4 分别较对照降低了 1.96 g、3.41 g、1.71 g、1.28 g 和 4.27 g、0.84 g、1.23 g、2.19 g。2013—2014 年各处理均较对照差异达到显著水平，且 A1、A2、A3 处理较对照差异达极显著水平，A2 较 A1、A3 和 A4 处理达极显著水平，但 A1、A3 和 A4 处理间差异不显著。2014—2015 年 A1、A4 处理较对照差异达到极显著水平，A3 较对照差异显著，A2 较对照差异不显著，

但A2和A3间差异不显著。B1和B2两年分别较对照增加1.10 g、1.42 g和0.89 g、0.60 g，且2013—2014年差异达到极显著水平。不同时段高温处理下叶面喷剂对粒重的增加表现了年际差异，2013—2014年不同时段高温处理下B1、B2较对照的粒重分别增加1.52%、3.01%，3.04%、5.96%，2.52%、2.37%和3.76%、4.33%，且处理间差异不显著，常温处理A5B1、A5B2较对照粒重分别增加2.25%和1.40%。说明在高温胁迫的情况下喷施B1和B2能起到增加粒重的作用，但在2014—2015年仅A1B1较对照增粒重的作用达极显著水平，其他时段的粒重影响不显著。

说明不同时段高温减产的主要原因表现在产量性状穗粒数或粒重的降低上，且受胁迫时段和时间长短的影响，A1时段高温胁迫时间最长，穗粒数和千粒重降低最多，平均产量最低。B1和B2两种喷剂均增加了穗粒数，但不同时段高温处理其作用效果有差异，高温胁迫时间越长，穗粒数减少越明显，但粒重受穗粒数制约，影响规律不明显，以B1的缓解效果最好。

2.2 不同时段高温处理对小麦粒重的影响

灌浆期是小麦产量形成的关键时期，而粒重是小麦籽粒产量的一个重要构成因素。小麦粒重变化的观测是取10穗长势较一致的挂牌穗测得的，与收获时产量结构中的粒重测定方法不同，但具有相同随不同处理变化的趋势。从表3小麦粒重的增长过程看，粒重的增长过程符合慢–快–慢的增长规律，高温胁迫处理均不同程度地降低了最终粒重，A1、A2、A3和A4分别较对照A5降低2.44 mg、3.72 mg、1.98 mg和1.10 mg，且差异达显著水平；而施用叶面喷剂起到了减少胁迫的负面影响，起到了增粒重的作用，B1、B2、B3喷剂处理粒重分别较对照B4处理提高1.73 mg、1.48 mg、0.54 mg，且B1、B2较对照差异达极显著水平。

2.3 不同时段高温处理对灌浆影响的数值特征

为了进一步研究灌浆期高温胁迫对籽粒灌浆的影响规律，将不同高温胁迫处理的小麦籽粒灌浆进程用Logistic模型回归模拟，获得了较理想的模拟效果，模拟方程的决定系数R^2均在0.99以上，达到极显著水平(表4)。

小麦粒重的高低决定于灌浆速率和灌浆时间等灌浆参数[21]。表5列出了不同处理拟合方程的灌浆特征值参数。从灌浆的特征参数看，不同时段高温处理(表6)A1、A2、A3和A4到达最大灌浆速率出现的时间较A5对照分别提早0.70 d、1.09 d、0.54 d和0.26 d，到达第1拐点的时间分别提前0.48 d、0.75 d、0.46 d和0.29 d，到达第2拐点的时间提前0.92 d、1.42 d、0.61 d和0.22 d，最大灌浆速率分别较对照降低0.07 mg·grain^{-1}·d^{-1}、0.11 mg·grain^{-1}·d^{-1}、0.09 mg·grain^{-1}·d^{-1}和0.08 mg·grain^{-1}·d^{-1}，平均灌浆速率较对照分别降低0.06 mg·grain^{-1}·d^{-1}、0.10 mg·grain^{-1}·d^{-1}、0.05 mg·grain^{-1}·d^{-1}和0.03 mg·grain^{-1}·d^{-1}。不同时段高温处理灌浆的快速持续期分别为13.63 d、13.39 d、13.91 d、14.13 d和14.07 d, A1、A2和A3时段高温处理的灌浆快速增长期较大田对照分别缩短0.44 d、0.67 d和0.16 d，灌浆后期高温处理对灌浆的快速增长期没有影响。说明不同时段高温处理对灌浆特征参数造成了影响，表现为最大灌浆速率和平均灌浆速率降低，到达第1拐点和第2拐点的时间提前，灌浆时间缩短，是粒重降低和产量下降的重要原因。总体来看，灌浆期高温胁迫影响小麦籽粒灌浆的主要数值特征为提早第1、第2拐点时间，缩短快速灌浆进程，且随胁迫时间发生越早提前值越大。

各喷剂处理模型拟合的数值特征值见表7，从表7叶面喷剂的影响来看，B1、B2和B3各喷剂处理不同程度地增加了粒重，以B1的增重效果最明显，从灌浆参数看，B1、B2和B3处理均不同程度地延后了到达第1和第2拐点的时间，到达第1和第2拐点的时间分别延后0.48 d、0.98 d、0.89 d和0.98 d、0.39 d、0.32 d，到达最大灌浆速率的时间分别延后0.73 d、0.69 d和0.61 d，最大灌浆速率分别提高0.03 mg·grain^{-1}·d^{-1}、0.16 mg·grain^{-1}·d^{-1}、0.11 mg·grain^{-1}·d^{-1}，平均灌浆速率分别提高0.04 mg·grain^{-1}·d^{-1}、0.03 mg·grain^{-1}·d^{-1}和0.01 mg·grain^{-1}·d^{-1}，因此叶面喷剂改善了灌浆的特征参数，延后了到达第1和第2拐点的时间，提高了平均灌浆速率，起到了增加粒重的作用，以B1的效果最好。

从不同时段高温处理叶面喷剂的缓冲效果看，以B1的效果最好，A1、A2、A3和A4处理下，B1分别较各自未进行叶面喷肥处理的快速增长期长0.58 d、0.77 d、0.69 d和0.33 d，常温处理下B1较不喷施的快速增长期长0.21 d，因此在高温情况下喷施叶面喷剂B1能起到较好的增产作用。

3 结论

高温加快作物的生育进程，缩短生育期[22]。小麦籽粒产量大部分来自开花后积累的光合产物，其所积累的光合产物约占光合总产量的1/2[23]。灌浆期

表 3　不同时段高温胁迫和喷剂处理小麦粒重的变化进程

Table 3　The grain weight changing of winter wheat under different treatments of high temperature stresses and foliar sprays

高温处理 High temperature treatment	叶面喷剂处理 Foliar spray treatment	测定时间(月–日) Measurement date (month-day)									
		05-03	05-07	05-11	05-15	05-19	05-23	05-27	05-31	06-04	06-08
A1	B1	1.86±0.11aA	4.53±0.11aA	7.81±0.08aA	11.68±0.36abAB	19.94±0.25aAB	29.29±2.75a	33.86±0.43cC	39.84±1.00a	42.31±0.77a	43.20±0.53a
	B2	1.36±0.12bC	4.03±0.14bB	6.53±0.27bB	11.25±0.53bcAB	20.17±0.87aAB	28.04±1.23a	35.98±0.40bB	39.50±1.10a	41.70±1.30a	42.89±1.14a
	B3	1.46±0.08bBC	4.41±0.13aAB	6.88±0.13bB	10.82±0.41cB	18.58±0.45bB	27.76±0.83a	36.11±0.56bAB	39.75±1.06a	41.67±1.31a	42.15±1.31a
	B4	1.75±0.13aAB	4.41±0.11aAB	7.53±0.27aA	12.47±0.43aA	21.01±0.65aA	28.92±0.59a	34.45±1.54aA	39.58±1.10a	40.93±1.82a	42.15±0.53a
A2	B1	1.86±0.11aA	4.53±0.11aA	7.81±0.08aA	11.68±0.36abAB	18.70±0.47a	30.19±0.28a	34.14±0.40bB	39.56±0.48aA	40.85±0.93a	42.87±2.47aA
	B2	1.36±0.12bC	4.03±0.14bB	6.53±0.27bB	11.25±0.53bcAB	19.51±0.40a	30.10±0.62a	35.83±0.37aA	39.80±1.02aA	40.82±0.36a	41.69±1.52abAB
	B3	1.46±0.08bBC	4.41±0.13aAB	6.88±0.13bB	10.82±0.41cB	19.27±1.03a	29.93±1.37a	33.71±0.15bB	36.96±2.10bB	39.64±1.21a	40.46±0.92bcB
	B4	1.75±0.13aAB	4.41±0.11aAB	7.53±0.27aA	12.47±0.43aA	19.09±1.21a	28.92±1.29a	34.54±1.21bAB	37.61±0.52bB	40.16±1.37a	40.28±0.62cB
A3	B1	1.86±0.11aA	4.53±0.11aA	7.81±0.08aA	11.68±0.36abAB	18.94±1.16a	28.75±2.07a	34.33±0.83b	39.67±0.70abA	43.36±1.20aA	43.55±0.31a
	B2	1.36±0.12bC	4.03±0.14bB	6.53±0.27bB	11.25±0.53bcAB	19.56±0.98a	30.21±1.83a	35.90±0.45a	40.27±1.17aA	42.78±1.51aA	43.42±0.17a
	B3	1.46±0.08bBC	4.41±0.13aAB	6.88±0.13bB	10.82±0.41cB	20.51±0.30a	28.00±0.67a	34.92±0.97b	38.56±0.41bcAB	41.74±1.31abAB	42.99±0.42a
	B4	1.75±0.13aAB	4.41±0.11aAB	7.53±0.27aA	12.47±0.43aA	19.61±0.58a	27.00±1.53a	34.97±0.67b	37.97±0.56cB	40.72±0.54bB	42.27±1.39a
A4	B1	1.86±0.11aA	4.53±0.11aA	7.81±0.08aA	11.68±0.36abAB	18.94±1.16a	28.66±0.89q	35.58±0.42a	40.17±0.70abAB	44.03±0.90a	45.25±0.41aA
	B2	1.36±0.12bC	4.03±0.14bB	6.53±0.27bB	11.25±0.53bcAB	19.56±0.98a	28.37±0.83q	35.32±0.29a	41.21±0.69aA	43.79±0.11a	44.48±0.42abAB
	B3	1.46±0.08bBC	4.41±0.13aAB	6.88±0.13bB	10.82±0.41cB	20.51±0.30a	29.93±0.52q	34.98±0.50a	39.01±1.78bB	41.56±0.70b	42.76±1.31bcAB
	B4	1.75±0.13aAB	4.41±0.11aAB	7.53±0.27aA	12.47±0.43aA	19.61±0.58a	28.24±0.79q	34.61±0.99a	39.18±0.99bB	42.12±1.48ab	43.26±0.35cB
A5	B1	1.86±0.11aA	4.53±0.11aA	7.81±0.08aA	13.12±0.48aA	18.94±1.16a	28.66±0.89q	36.55±1.20aA	42.16±0.65a	44.17±0.56a	45.78±0.60a
	B2	1.36±0.12bC	4.03±0.14bB	6.53±0.27bB	10.31±0.51bC	19.56±0.98a	28.37±0.83q	34.63±0.35bB	41.09±0.42a	43.71±1.32a	45.49±0.78a
	B3	1.46±0.08bBC	4.41±0.13aAB	6.88±0.13bB	11.00±0.40bBC	20.51±0.30a	29.93±0.52q	37.41±0.39aA	41.61±0.70a	44.68±0.55a	44.87±0.69a
	B4	1.75±0.13aAB	4.41±0.11aAB	7.53±0.27aA	12.24±0.76aAB	19.61±0.58a	28.24±0.79q	34.61±0.20bB	41.71±0.21a	43.15±0.25a	44.02±0.49a

表 4 不同时段高温胁迫和喷剂处理粒重模拟方程及理论粒重

Table 4 The grain filling process models and grain weights of winter wheat under different treatments of high temperature stresses and foliar sprays

高温处理 High temperature treatment	叶面喷剂处理 Foliar spray treatment	籽粒灌浆方程 Model of grain filling process	决定系数 Coefficient of determination (R^2)	理论粒重 Simulated grain weight (mg)
A1	B1	Y_t=44.819 7/(1+e$^{3.677\ 3-0.182\ 9t}$)	0.998 0**	44.82
	B2	Y_t=43.878 1/(1+e$^{3.997\ 7-0.200\ 6t}$)	0.999 0**	43.88
	B3	Y_t=43.830 9/(1+e$^{4.052\ 7-0.201\ 1t}$)	0.997 7**	43.83
	B4	Y_t=43.221 3/(1+e$^{3.697\ 9-0.190\ 6t}$)	0.999 0**	43.22
A2	B1	Y_t=43.815 3/(1+e$^{3.706\ 3-0.187\ 2t}$)	0.998 0**	43.82
	B2	Y_t=42.855 3/(1+e$^{4.064\ 1-0.207\ 1t}$)	0.998 7**	42.86
	B3	Y_t=41.526 9/(1+e$^{3.874\ 3-0.195\ 8t}$)	0.998 3**	41.53
	B4	Y_t=41.325 6/(1+e$^{3.733\ 6-0.198\ 1t}$)	0.999 0**	41.33
A3	B1	Y_t=45.470 6/(1+e$^{3.681\ 0-0.181\ 7t}$)	0.998 0**	45.47
	B2	Y_t=44.862 8/(1+e$^{3.983\ 7-0197\ 3t}$)	0.999 1**	44.86
	B3	Y_t=44.315 1/(1+e$^{3.886\ 3-0.189\ 8t}$)	0.998 6**	44.32
	B4	Y_t=42.821 9/(1+e$^{3.679\ 7-0.190\ 7t}$)	0.999 0**	42.82
A4	B1	Y_t=46.914 9/(1+e$^{3.703\ 5-0.180\ 1t}$)	0.998 6**	46.91
	B2	Y_t=46.280 2/(1+e$^{3.928\ 5-0.190\ 6t}$)	0.999 1**	46.28
	B3	Y_t=44.144 0/(1+e$^{3.919\ 2-0.192\ 2t}$)	0.998 6**	44.14
	B4	Y_t=44.405 0/(1+e$^{3.642\ 9-0.184\ 2t}$)	0.999 1**	44.41
A5	B1	Y_t=47.967 0/(1+e$^{3.705\ 1-0.178\ 5t}$)	0.998 3**	47.97
	B2	Y_t=46.952 9/(1+e$^{3.956\ 1-0.188\ 3t}$)	0.998 6**	46.95
	B3	Y_t=46.378 7/(1+e$^{4.078\ 0-0.202\ 6t}$)	0.998 6**	46.38
	B4	Y_t=46.289 2/(1+e$^{3.721\ 1-0.181\ 2t}$)	0.998 2**	46.29

示极显著相关。 means significant correlation at 0.01 level.

表 5 不同时段高温胁迫和喷剂处理对小麦灌浆特征参数的影响

Table 5 Effects of different treatments of high temperature stresses and foliar sprays on the grain filling parameters

高温处理 High temperature treatment	叶面喷剂处理 Foliar spray treatment	最大灌浆速率出现的天数 Time to maximum filling rate (d)	第 1 拐点时间 First inflection point (d)	第 2 拐点时间 Second inflection point (d)	最大灌浆速率 Maximum filling rate (mg·grain^{-1}·d^{-1})	平均灌浆速率 Average filling rate (mg·grain^{-1}·d^{-1})
A1	B1	20.11	12.91	27.31	2.05	1.11
	B2	19.93	13.36	26.49	2.20	1.10
	B3	20.16	13.61	26.71	2.20	1.08
	B4	19.40	12.49	26.31	2.06	1.08
A2	B1	19.79	12.76	26.83	2.05	1.10
	B2	19.62	13.27	25.98	2.22	1.07
	B3	19.79	13.07	26.52	2.03	1.04
	B4	18.85	12.20	25.50	2.05	1.03
A3	B1	20.26	13.01	27.51	2.07	1.12
	B2	20.19	13.51	26.86	2.21	1.11
	B3	20.47	13.53	27.41	2.10	1.10
	B4	19.30	12.39	26.20	2.04	1.08
A4	B1	20.56	13.25	27.88	2.11	1.16
	B2	20.61	13.70	27.52	2.21	1.14
	B3	20.39	13.54	27.24	2.12	1.10
	B4	19.78	12.63	26.93	2.04	1.11
A5	B1	20.75	13.38	28.13	2.14	1.17
	B2	21.02	14.02	28.01	2.21	1.17
	B3	19.82	13.42	26.23	2.39	1.15
	B4	20.54	13.27	27.81	2.10	1.13

表 6　不同时段高温胁迫处理对小麦灌浆特征参数的影响
Table 6　Effects of different high temperature stresses on the grain filling parameters of winter wheat

高温处理 High temperature treatment	最大灌浆速率出现的天数 Time to maximum filling rate (d)	第 1 拐点时间 First inflection point (d)	第 2 拐点时间 Second inflection point (d)	最大灌浆速率 Maximum filling rate (mg·grain^{-1}·d^{-1})	平均灌浆速率 Average filling rate (mg·grain^{-1}·d^{-1})
A1	20.11	12.91	27.31	2.05	1.11
A2	19.79	12.76	26.83	2.05	1.10
A3	20.26	13.01	27.51	2.07	1.12
A4	20.56	13.25	27.88	2.11	1.16
A5	20.75	13.38	28.13	2.14	1.17

表 7　不同叶面喷剂处理对小麦灌浆特征参数的影响
Table 7　Effects of different foliar sprays on the grain filling parameters of winter wheat

叶面喷剂处理 Foliar spray treatment	最大灌浆速率出现的天数 Time to maximum filling rate (d)	第 1 拐点时间 First inflection point (d)	第 2 拐点时间 Second inflection point (d)	最大灌浆速率 Maximum filling rate (mg·grain^{-1}·d^{-1})	平均灌浆速率 Average filling rate (mg·grain^{-1}·d^{-1})
B1	20.30	13.06	27.55	2.08	1.13
B2	20.26	13.56	26.96	2.21	1.12
B3	20.19	13.48	26.90	2.16	1.09
B4	19.58	12.58	26.57	2.05	1.09

高温胁迫抑制小麦冠层碳同化[24], 叶片光合产物输出动态发生紊乱, 光合持续期缩短, 减少了源的供应量, 抑制籽粒中光合产物的累积[13], 从而粒重降低, 产量下降[25–28]。本研究中不同时段高温不同程度地对产量造成了影响, 高温胁迫时间最长的 A1 处理减产幅度最大, A2 对产量的影响次之; 产量性状则表现为穗粒数和粒重降低。籽粒灌浆模型较好地模拟了籽粒的灌浆进程, 其决定系数均在 0.99 以上。灌浆特征参数表现在不同时段高温处理到达第 1 和第 2 拐点的时间提前, 灌浆时间缩短, 平均灌浆速率和最大灌浆速率下降, 最终粒重和产量降低, 和前人的研究结果一致[29–31]。

本研究中叶面喷肥起到了增产的作用, 不同程度地增加了穗粒数或提高了粒重。从灌浆过程模拟模型看, 与高温胁迫的作用正相反, 使到达第 1 和第 2 拐点的时间延后, 延长了灌浆的时间, 平均灌浆速率和最大灌浆速率提高, 说明叶面喷剂能起到延缓叶片衰老促进光合作用的目的[32–34]。不同时段高温胁迫下各喷剂的缓冲作用, 以喷施 B1 效果最好, 延长了灌浆的快速增长期, 提高了粒重, 起到了很好的增产作用, 是小麦增产和减灾的重要措施之一[35–37]。

小麦具有获得耐热性, 小麦的耐热性随着花后生育进程而下降, 前期高温胁迫处理的旗叶内活性氧防卫系统能更有效地启动, 而后期造成的伤害不可恢复[9]。花后 20~22 d 高温处理对小麦籽粒发育及粒重的影响最大[38]。本研究中以灌浆后期高温 A4 处理(花后 20~25 d, 16~21 d)减产幅度最小, 以 A3 时段高温(花后 15~20 d, 14~20 d)对产量的影响相对较大, 且粒重以花后 12~16 d (2013—2014 年)和 16~21 d (2014—2015 年)影响最大, 穗粒数以花后 12~16 d (2013—2014 年)和花后 14~20 d (2014—2015 年)影响相对较大。两年结果有时段上的差异, 因此气候年型和小麦阶段耐热性的关系以及生育期灌水等的影响还有待进一步深入研究。

参考文献　References

[1] 代晓华, 康建宏, 邬雪婷. 花后不同时期高温对春小麦淀粉含量和产量的影响研究[J]. 农业科学研究, 2013, 34(4): 5–12
Dai X H, Kang J H, Wu X T. Impacts of the high temperature after the flowering period on the starch content and yield of the spring wheat[J]. Journal of Agricultural Sciences, 2013, 34(4): 5–12

[2] 马元喜. 小麦超高产应变栽培技术[M]. 北京: 中国科技出版社, 1996: 3–8
Ma Y X. Cultivation Techniques of Super High Yield in Wheat[M]. Beijing: China Science and Technology Press, 1996: 3–8

[3] 徐如强, 孙其信, 张树榛. 不同耐热性小麦品种的籽粒灌浆特性及其对高温反应的初步研究[J]. 中国农学通报, 1996, 12(6): 7–10
Xu R Q, Sun Q X, Zhang S Z. Preliminary study on grain filling characteristics of wheat cultivars with different heat high temperature tolerance[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 1996, 12(6): 7–10

[4] 徐如强, 孙其信, 张树榛. 不同冬小麦品种对高温胁迫反应的研究[J]. 中国农业大学学报, 1998, 3(1): 99–104
Xu R Q, Sun Q X, Zhang S Z. Studies on the responses of

winter wheat genotypes to high temperature stress[J]. Journal of China Agricultural University, 1998, 3(1): 99–104

[5] 李永庚, 于振文, 张秀杰, 等. 小麦产量与品质对灌浆不同阶段高温胁迫的响应[J]. 植物生态学报, 2005, 29(3): 461–466
Li Y G, Yu Z W, Zhang X J, et al. Response of yield and quality of wheat to heat stress at different grain filling stages[J]. Acta Phytoecologica Sinica, 2005, 29(3): 461–466

[6] 郭天财, 王晨阳, 朱云集, 等. 后期高温对冬小麦根系及地上部衰老的影响[J]. 作物学报, 1998, 24(6): 957–962
Guo T C, Wang C Y, Zhu Y J, et al. Effects of high temperature on the senescence of root and top-partial of wheat plant in the later stage[J]. Acta Agronomica Sinica, 1998, 24(6): 957–962

[7] Jenner C F. The physiology of starch and protein deposition in the endosperm of wheat[J]. Australian Journal of Plant Physiology, 1991, 18(3): 211–226

[8] 敬海霞, 王晨阳, 左学玲, 等. 花后高温胁迫对小麦籽粒产量和蛋白质含量的影响[J]. 麦类作物学报, 2010, 30(3): 459–463
Jing H X, Wang C Y, Zuo X L, et al. Effect of post-anthesis high temperature stress on grain yield and protein content of different wheat cultivars[J]. Journal of Triticeae Crops, 2010, 30(3): 459–463

[9] 姜春明, 尹燕枰, 刘霞, 等. 不同耐热性小麦品种旗叶膜脂过氧化和保护酶活性对花后高温胁迫的响应[J]. 作物学报, 2007, 33(1): 143–148
Jiang C M, Yin Y P, Liu X, et al. Response of flag leaf lipid peroxidation and protective enzyme activity of wheat cultivars with different heat tolerance to high temperature stress after anthesis[J]. Acta Agronomica Sinica, 2007, 33(1): 143–148

[10] 郭秀林, 李慧聪, 刘子会, 等. 不同基因型小麦对热处理的响应[J]. 麦类作物学报, 2013, 33(3): 514–519
Guo X L, Li H C, Liu Z H, et al. Response of different genotypes of winter wheat to heat treatment[J]. Journal of Triticeae Crops, 2013, 33(3): 514–519

[11] Plaut Z, Butow B J, Blumenthal C S, et al. Transport of dry matter into developing wheat kernels and its contribution to grain yield under post-anthesis water deficit and elevated temperature[J]. Field Crops Research, 2004, 86(2/3): 185–198

[12] Hays D B, Do J H, Mason R E, et al. Heat stress induced ethylene production in developing wheat grains induces kernel abortion and increased maturation in a susceptible cultivar[J]. Plant Science, 2007, 172(6): 1113–1123

[13] 郭文善, 施劲松, 彭永欣, 等. 灌浆期高温对小麦光合产物运转的影响[J]. 核农学报, 1998, 12(1): 21–27
Guo W S, Shi J S, Peng Y X, et al. Effect of high temperature on transportation of assimilate from wheat flag leaf during grain filling stage[J]. Acta Agriculturae Nucleatae Sinica, 1998, 12(1): 21–27

[14] 王晨阳, 何英, 郭天财, 等. 灌浆期高温胁迫对强筋小麦旗叶叶绿素 a 荧光参数的影响[J]. 麦类作物学报, 2005, 25(6): 87–90
Wang C Y, He Y, Guo T C, et al. Effects of post-anthesis heat stress on chlorophyll a fluorescence parameters in flag leaves of strong-gluten winter wheat[J]. Journal of Triticeae Crops, 2005, 25(6): 87–90

[15] Rehman A, Habib I, Ahmad N, et al. Screening wheat germplasm for heat tolerance at terminal growth stage[J]. Plant Omics Journal, 2009, 2(1): 9–19

[16] 解树斌, 曹新有, 刘建军, 等. 高温与干热风对小麦的影响及其防控措施[J]. 山东农业科学, 2013, 45(3): 126–131
Xie S B, Cao X Y, Liu J J, et al. Effects of high-temperature and hot-dry wind on wheat and preventative measures[J]. Shandong Agricultural Sciences, 2013, 45(3): 126–131

[17] 郑飞, 臧秀旺, 黄保荣, 等. 灌浆期高温胁迫对冬小麦叶源、库器官生理活性的影响及调控[J]. 华北农学报, 2001, 16(2): 99–103
Zheng F, Zang X W, Huang B R, et al. Effects of high temperature stress on the source and sink organ of winter wheat during filling stage and its regulation[J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 2001, 16(2): 99–103

[18] 刘海英, 郭天财, 朱云集, 等. 开花期喷施水杨酸对不同类型专用小麦品种籽粒淀粉及产量的影响[J]. 麦类作物学报, 2006, 26(4): 123–127
Liu H Y, Guo T C, Zhu Y J, et al. Effect of spraying salicylic acid (SA) at anthesis on grain starch properties and yield of winter wheat cultivars with different end-use qualities[J]. Journal of Triticeae Crops, 2006, 26(4): 123–127

[19] 薛香, 吴玉娥, 陈荣江, 等. 小麦籽粒灌浆过程的不同数学模型模拟比较[J]. 麦类作物学报, 2006, 26(6): 169–171
Xue X, Wu Y E, Chen R J, et al. Comparison of different mathematical equations for simulating the grain filling process of wheat[J]. Journal of Triticeae Crops, 2006, 26(6): 169–171

[20] 唐启义. DPS 数据处理系统[M]. 北京: 科学出版社, 2010
Tang Q Y. DPS Data Processing System[M]. Beijing: Science Press, 2010

[21] 夏国军, 崔金梅, 郭天财, 等. 小麦灌浆期间温度与千粒重关系的研究[J]. 河南农业大学学报, 2003, 37(3): 213–216
Xia G J, Cui J M, Guo T C, et al. Study on relationship between temperature and the grain weight in the grain filling period of winter wheat[J]. Journal of Henan Agricultural University, 2003, 37(3): 213–216

[22] 郭建平, 高素华. 高温、高 CO_2 对农作物影响的试验研究[J]. 中国生态农业学报, 2002, 10(1): 17–20
Guo J P, Gao S H. The experimental study on impacts of high temperature and high CO_2 concentration on crops[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2002, 10(1): 17–20

[23] 姜东, 于振文, 李永庚, 等. 冬小麦叶茎粒可溶性糖含量变化及其与籽粒淀粉积累的关系[J]. 麦类作物学报, 2001, 21(3): 38–41
Jiang D, Yu Z W, Li Y G, et al. Changes of soluble sugar contents in leaf, stem and grain in winter wheat and its relationship with grain starch accumulation[J]. Acta Tritical Crops, 2001, 21(3): 38–41

[24] 姜雨萌, 赵风华, 刘金秋, 等. 极端高温对冬小麦冠层碳同化的影响[J]. 中国生态农业学报, 2015, 23(10): 1260–1267
Jiang Y M, Zhao F H, Liu J Q, et al. Effect of extreme heat on

winter wheat canopy carbon assimilation[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2015, 23(10): 1260–1267

[25] 王邦锡, 杜元琦, 齐明启, 等. 小麦在干热风条件下的生理变化Ⅱ. 干热风对小麦灌浆期 $^{14}CO_2$ 同化作用和 ^{14}C-同化产物累积的影响[J]. 植物学报, 1978, 20(1): 37–43
Wang B X, Du Y S, Qi M Q, et al. Physiological changes of wheat under the dry-hot-wind condition Ⅱ. Effect of dry-hot-wind on the $^{14}CO_2$-assimilation and accumulation of ^{14}C-assimilates during grain filling period in wheat[J]. Journal of Integrative Plant Biology, 1978, 20(1): 37–43

[26] Asseng S, Jamieson P D, Kimball B, et al. Simulated wheat growth affected by rising temperature, increased water deficit and elevated atmospheric CO_2[J]. Field Crops Research, 2004, 85(2/3): 85–102

[27] Matsuki J, Yasui T, Kohyama K, et al. Effects of environmental temperature on structure and gelatinization properties of wheat starch[J]. Cereal Chemistry, 2003, 80(4): 476–480

[28] Wardlaw I F. Interaction between drought and chronic high temperature during kernel filling in wheat in a controlled environment[J]. Annals of Botany, 2002, 90(4): 469–476

[29] 王志强, 周晓明, 申占保, 等. 播期对不同专用型小麦籽粒灌浆特征参数和产量的影响[J]. 河南农业科学, 2003(4): 4–6
Wang Z Q, Zhou X M, Shen Z B, et al. Effect of sowing date on grain filling characteristic parameter and yield of special used wheat[J]. Journal of Henan Agricultural Sciences, 2003(4): 4–6

[30] 胡吉帮, 王晨阳, 郭天财, 等. 灌浆期高温和干旱对小麦灌浆特性的影响[J]. 河南农业大学学报, 2008, 42(6): 597–601
Hu J B, Wang C Y, Guo T C, et al. Effects of high temperature and drought stress on grain filling characteristics in wheat during grain filling period[J]. Journal of Henan Agricultural University, 2008, 42(6): 597–601

[31] 金善宝. 中国小麦学[M]. 北京: 中国农业出版社, 1996
Jin S B. Wheat Science in China[M]. Beijing: Agricultural Press of China, 1996

[32] 时凤云, 徐文国, 吴建河, 等. 濮阳近 40 年干热风特征和成因分析及防御[J]. 中国农学通报, 2009, 25(3): 251–254
Shi F Y, Xu W G, Wu J H, et al. The reason analysis and defense of dry-hot wind’s characters in recent forty years of Puyang City[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2009, 25(3): 251–254

[33] 李东升. 干热风天气对小麦的危害及防御对策[J]. 河南农业, 2007(12): 18–19
Li D S. The harm of dry-hot-wind to wheat and defense countermeasures[J]. Agriculture of Henan, 2007(12): 18–19

[34] 戚尚恩, 杨太明, 孙有丰, 等. 淮北地区小麦干热风发生规律及防御对策[J]. 安徽农业科学, 2012, 40(1): 401–404
Qi S E, Yang T M, Sun Y F, et al. Occurrence rules and preventive measures of wheat dry hot wind in Huaibei Area[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2012, 40(1): 401–404

[35] 杨芳. 小麦干热风灾害及其防灾减灾技术[J]. 实用技术, 2011(7): 48–49
Yang F. Dry-hot-wind disaster and technologies of prevention in wheat[J]. Journal of Practical Technology, 2011(7): 48–49

[36] 姜彩莲. 干热风对冬小麦的影响及预防措施[J]. 农村科技, 2011(6): 34
Jiang C L. Effects of dry-hot-wind on winter wheat and preventive measures[J] Rural Science & Technology, 2011(6): 34

[37] 曹彩云, 李伟, 党红凯, 等. 8 种叶面喷剂对小麦产量及籽粒灌浆特性的影响[J]. 河北农业科学, 2015, 19(1): 6–9
Cao C Y, Li W, Dang H K, et al. Effects of 8 kinds of foliar sprays on wheat yield and grain filling characteristics[J]. Journal of Hebei Agricultural Sciences, 2015, 19(1): 6–9

[38] 封超年, 郭文善, 施劲松, 等. 小麦花后高温对籽粒胚乳细胞发育及粒重的影响[J]. 作物学报, 2000, 26(4): 399–405
Feng C N, Guo W S, Shi J S, et al. Effect of high temperature after anthesis on endosperm cell development and grain weight in wheat[J]. Acta Agronomica Sinica, 2000, 26(4): 399–405